

УДК 004.056.53

Численный анализ пространственного распространения звука в твердом теле

*Филева С.А., студент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Защита информации»*

*Научный руководитель: Мурашов М.В., к.т.н,
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Защита информации»
murashov@bmstu.ru*

1. Введение.

Акустические сигналы, распространяющиеся в помещениях, отражаются и поглощаются стенами, дверями, окнами и другими ограждающими конструкциями. Поэтому возможен перехват информации в незащищенных помещениях. Снятие информации осуществляется специальными контактными микрофонами (стетоскопы), которые воспринимают колебания ограждающих конструкций.

Защита от утечки акустической информации за счет виброакустических каналов осуществляется следующим образом [1].

На защищаемые строительные конструкции устанавливаются вибрационные излучатели, подключенные к генераторам виброакустического шума. Таким образом, в ограждающих конструкциях создают помеху, заведомо превышающую наведенный акустический сигнал полезной информации. Утечки информации по виброакустическому каналу нет, если уровень помехи превышает уровень полезного сигнала на 20 дБ [5]. Для защиты стен ставят 1 виброизлучатель "ВИ-45", на каждые 3...5 метров защищаемого периметра [4].

Однако, существует предположение, что данной защиты может быть недостаточно. Так как виброакустический излучатель вызывает колебания в защищаемой конструкции в одном направлении, может появиться утечка информации по другим двум осям. Цель данной работы проверить численными методами это предположение и уточнить, насколько это может быть опасно для защищаемой информации.

В теоретической акустике задачи распространения звука в помещении являются задачами ближнего поля и составляют большую трудность, поэтому расчет производится

с помощью численных методов. Использовалась универсальная программная система конечно-элементного анализа ANSYS. Так как численное моделирование широкополосных сигналов в данной задаче затруднительно, то в качестве виброизлучателя и источника звука используется тональный сигнал на частоте 1000 Гц.

2. Описание моделей.

В данной работе рассматривается распространение вибрационных колебаний в стене под действием источника звука (колонки) в воздухе и под действием виброизлучателя, прикрепленного к такой же стенке. Виброизлучатель и источник звука вызывают колебания по направлению к стене (по оси z). Цель: выяснить, какой процент соотношения амплитуд виброперемещений по двум другим осям (x и y) распространяется по стене; защищена ли стена от утечки информации по вибрационному каналу с помощью виброакустического излучателя по осям x и y .

Для выполнения поставленной цели, необходимо определить поле амплитуд колебаний на стене $A(x,y,z)$. Для сравнения амплитуд колебаний построены две модели, чтобы отдельно посмотреть влияния каждого из источников сигналов.

Первая модель представляет собой бетонную стену и прикрепленный к ней виброакустический излучатель (рис.1). Для исследования была взята тонкая стена больших размеров, чтобы избежать влияние конструкции на распространение звука в твердом теле. Для соединения объемов использовались контактные конечные элементы TARGET170 и CONTA174. Алгоритмом контакта выбирался MPC algorithm. Используется определение контакта в узлах по направлению к нормали к элементам TARGET170. За основу виброизлучателя был взят реальный прибор – ВИ-45 производства НПО АННА [4].

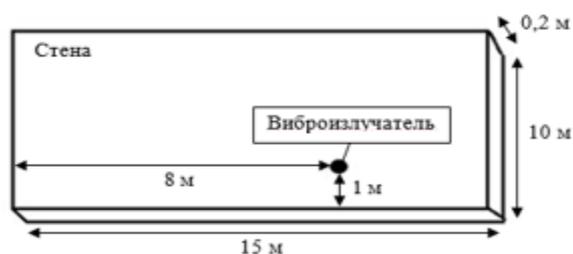


Рис. 1. Первая модель

Вторая модель – это та же бетонная стена и источник звука, который отделен от стены воздухом. За источником звука на 4 метра смоделирован воздух (рис.2). Для соединения объемов использовалась операция 'glue' в ПК ANSYS. В воздухе был введен слой на границе с твердыми телами: вокруг источника звука и около стены. По другим

границам объема, занимаемого воздухом, задано граничное условие, которое соответствует контакту воображаемой стены и воздуха.

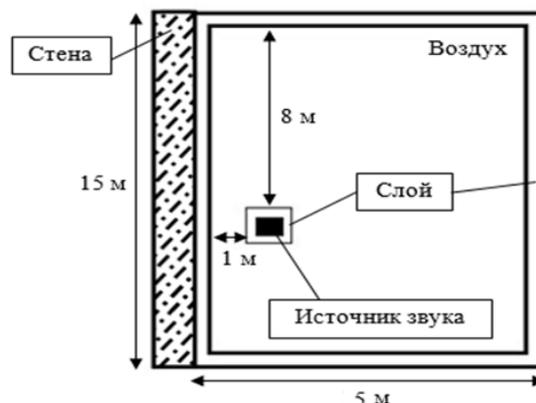


Рис. 2. Вторая модель, представленная в разрезе

Источник звука и виброизлучатель выполнены из стали. Амплитуда колебаний виброизлучателя и источника звука составляет 0.2 мм по оси z .

Свойства бетона: плотность 2350 кг/м³, модуль Юнга 34.5 ГПа, коэффициент Пуассона 0.17, коэффициент поглощения 0.05. Свойства стали: плотность 7800 кг/м³, модуль Юнга 210 ГПа, коэффициент Пуассона 0.29, коэффициент поглощения 0. Свойства воздуха: плотность 1.225 кг/м³, скорость звука 340.31 м/с, коэффициент поглощения 0.03. Источник звука имеет размеры 0.41*0.41*0.41 м. Виброизлучатель – это цилиндр, радиус 0.023 м, высота 0.025 м. Слои созданы шириной 0,2 м.

Для рассматриваемых моделей запишем следующую систему дифференциальных уравнений, отвечающих физике процессов:

$$\text{уравнение звуковой волны в воздушной среде: } \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} - \nabla^2 P = 0;$$

$$\text{уравнение колебаний в твердом теле: } m\ddot{\bar{u}} + b\dot{\bar{u}} + k\bar{u} = 0;$$

условия на границе контакта газ-твердое тело:

$$\bar{n} * \nabla P|_{\text{гр}} = -\rho_0 \bar{n} * \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial t^2}|_{\text{гр}},$$

где c - скорость звука, P – акустическое давление, t – время, m – масса, b – поглощение, k – жесткость, \bar{u} – вектор амплитуды перемещения, \bar{n} – нормаль к границе газ-твердое тело, ρ_0 – плотность газа.

Так как искомые величины гармонически изменяются, то, задавая частоту колебаний, от нестационарной задачи переходим к задаче относительно амплитуд.

3. Расчеты.

В процессе моделирования стена, виброизлучатель и источник звука разбивалась на элементы типа SOLID186 (3-D структурное тело), воздух – на FLUID221 (акустический элемент). Слой на границе твердого тела и воздуха – на FLUID220 (акустический элемент, у которого есть возможность включать затухание звукопоглощающего материала в интерфейсе).

Чтобы получить более достоверный результат в ПК ANSYS, необходимо сначала проанализировать и выбрать необходимое разбиение объемов на конечные элементы. Изначально стена делится на три слоя по толщине. Сделать один слой будет не верным шагом, так как это приведет к появлению ошибок при расчете из-за погрешности МКЭ. По длине стена делится на 15, 30 и 60 конечных элементов, чтобы выбрать подходящее разбиение.

Результаты амплитуды колебаний по оси x приведены на рисунках 3-5. Одинаковым цветом обозначены одинаковые амплитуды. Так же приведено сеточное разбиение для деления на 15 и 60 конечных элементов.

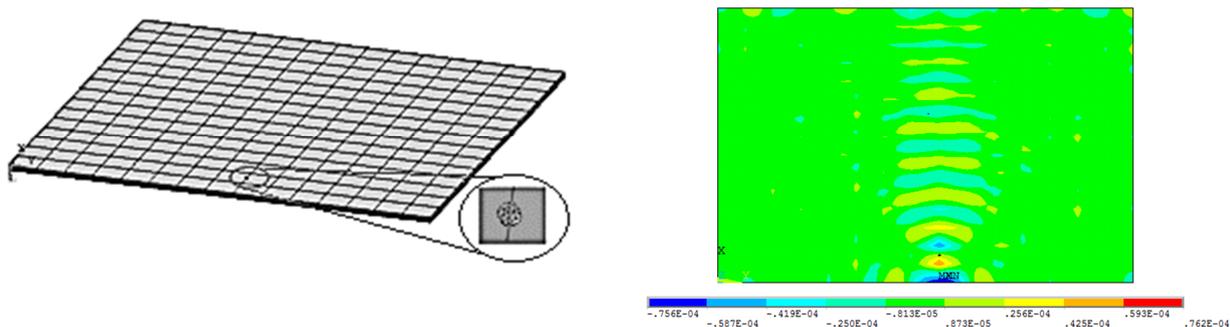


Рис. 3. Разбиение первой модели на 15 конечных элементов по длине. Максимум расположен на обратной стороне стены

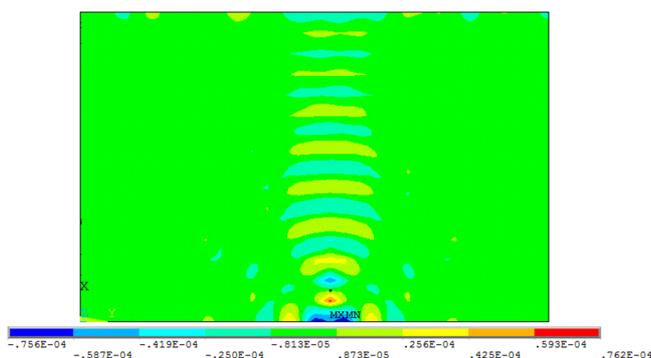


Рис. 4. Разбиение на 30 конечных элементов по длине

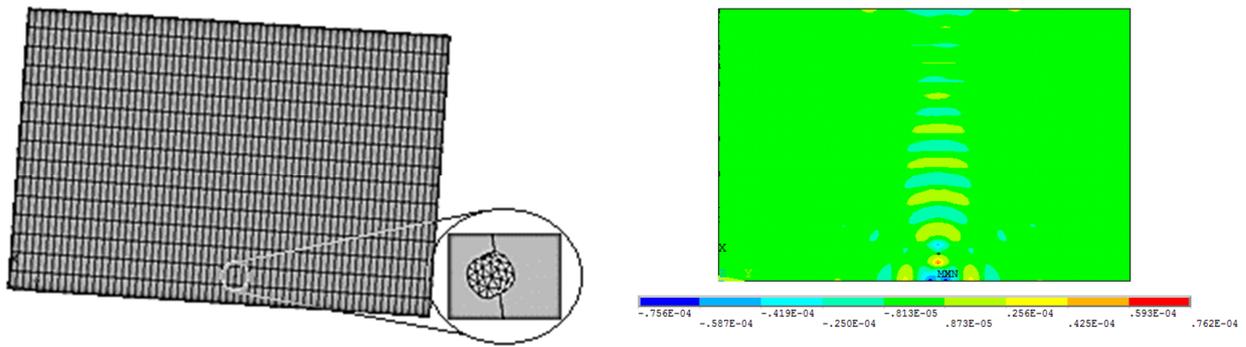


Рис. 5. Разбиение на 60 конечных элементов по длине

Из рисунков 3 - 5 видно, что деление на 15 конечных элементов дает грубую сетку и при выводе графиков видны большие погрешности. По сравнению с измерениями, в которых больше элементов, расхождение результатов достигает 30 %, следовательно, такое разбиение не подходит. Рисунок с разбиением на 60 элементов отображает меньше погрешностей. На всякий случай построено деление на 120 конечных элементов по длине. Такое разбиение на 120 элементов уточняет решение при 60 конечных элементах на 4 %, однако требуется достаточно длительное время для расчета и большой объем памяти. Поэтому все дальнейшие расчеты проводились с разбиением на 60 конечных элементов по длине.

Расчет амплитуды колебаний на стенке, при включенном виброизлучателе, на частоте 1 кГц показал следующие результаты. На рисунках 6-8 представлены поля амплитуд вибрационных колебаний на стене.

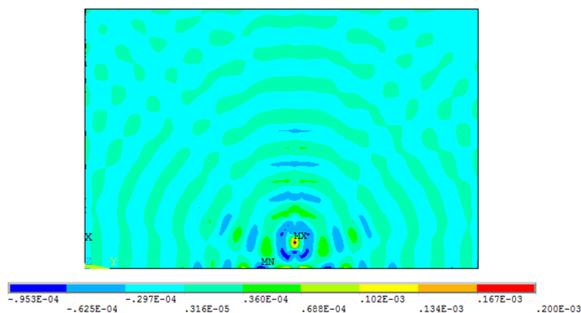


Рис. 6. Вибрационные колебания
по оси z, м

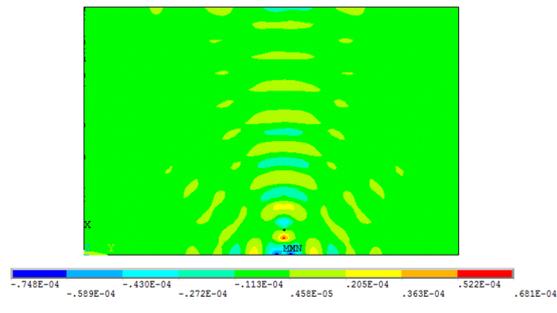


Рис. 7. Вибрационные колебания по оси x, м

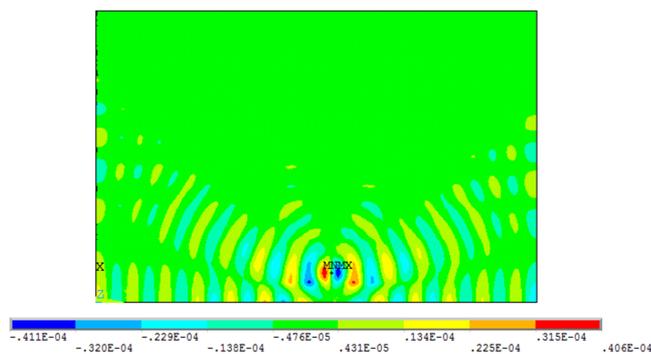


Рис. 8. Вибрационные колебания по оси y, м

Процент вибрационных колебаний по осям x и y, распространяющихся по стене:

$$\frac{A_{\max x}}{A_{\max z}} = 51 \%, \frac{A_{\max y}}{A_{\max z}} = 25 \%$$

При расчете берем максимальную амплитуду по осям x и y и делим на максимальную амплитуду по оси z, так как виброизлучатель колеблется по оси z. Из результатов видно, что распространение колебаний по осям x и y достаточно для утечки информации.

Расчет амплитуды колебаний на стенке, при включенном источнике звука в воздухе, на частоте 1 кГц в показал следующие результаты. Источник звука расположен на таком же уровне, как виброизлучатель в первой модели. На рисунках 9-11 приведены сетка конечных элементов, поле амплитуды колебания стены $A(x,y,z)$ и поле давлений $P(x,y,z)$.

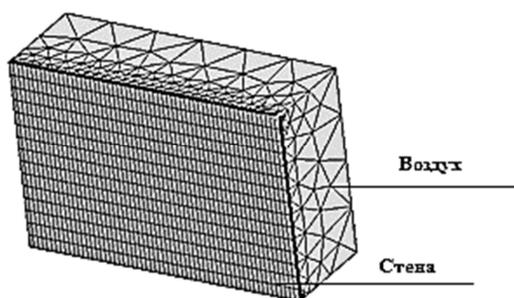
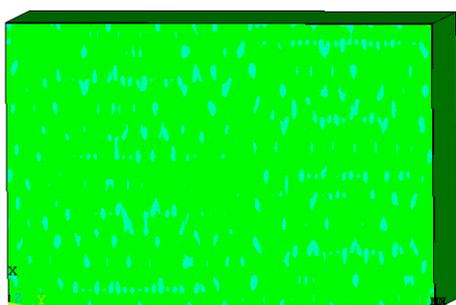
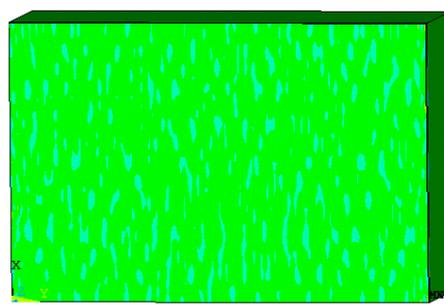


Рис. 9. Сетка конечных элементов второй модели.



а)



б)

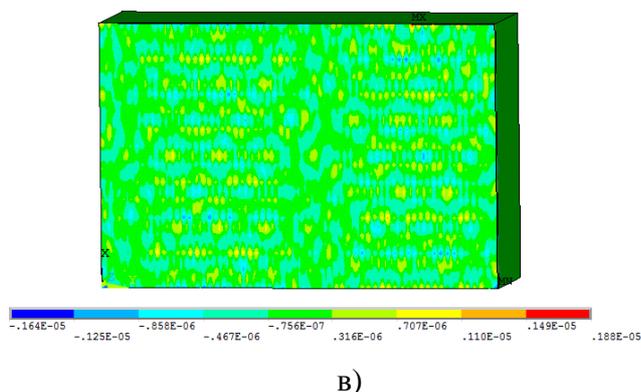


Рис. 10. Вибрационные колебания: а) по оси x, м; б) по оси y, м; в) по оси z, м

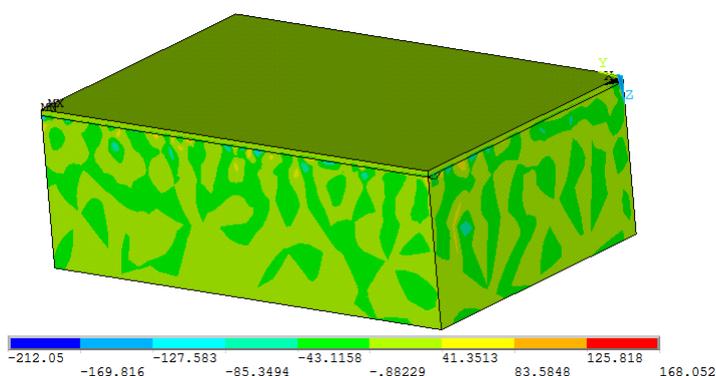


Рис. 11. Поле давлений в воздухе, Па

Процент вибрационных колебаний по осям x и y, распространяющихся по стене:

$$\frac{A_{\max x}}{A_{\max z}} = 28 \%, \quad \frac{A_{\max y}}{A_{\max z}} = 64 \%$$

Видно, что распространение звука по другим осям также достаточно для утечки информации.

Для того, чтобы проверить защищает ли виброакустический излучатель стену, рассчитаем максимальную амплитуду от излучателя, которая может быть на стене. Утечки информации по виброакустическому каналу нет, если на стене уровень сигнала от виброизлучателя превышает уровень сигнала от источника на 20 дБ [5].

$$\frac{A_{\max}}{\sqrt{2}} * f^2 = a ,$$

где A_{\max} - это максимальное значение амплитуды по выбранной оси;
 f – частота, a – ускорение [2].

Для перевода в дБ:

$20 \log\left(\frac{a}{a_0}\right)$, где $a_0 = 10^{-5}$ м/с, нулевой уровень ускорения в виброакустике [3].

$$A_{\max x} = 0.523 * 10^{-5} \text{ м}$$

$$A_{max y} = 0.12 \cdot 10^{-4} \text{ м}$$

$$A_{max z} = 0.186 \cdot 10^{-4} \text{ м}$$

Выделим диапазон, где уровень амплитуд от виброизлучателя не превышает максимальный уровень от источника звука и в котором идет утечка информации. Таким образом нашли незащищенные места, где возможно обнаружить факт разговора и места, где возможно прослушивание информации. На рисунках 12-14 белым обозначены места, где стена полностью защищена от прослушивания или от обнаружения факта разговора в зависимости от рисунка.

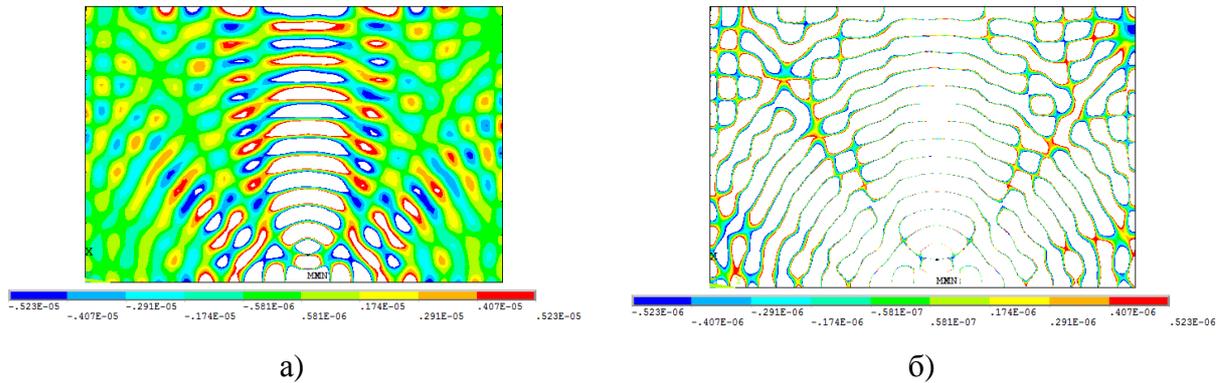


Рис.12. Незащищенные места на стене (амплитуда колебаний по оси ox):

а) обнаружение факта разговора; б) прослушивание информации

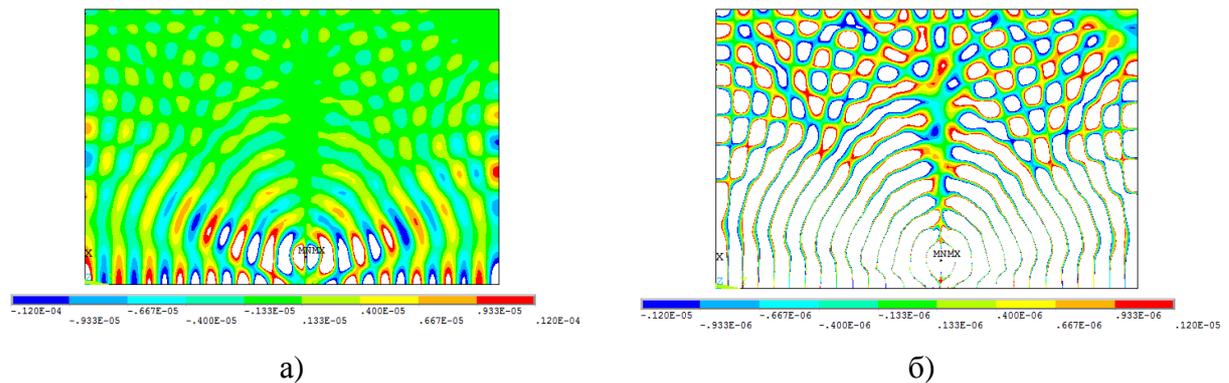


Рис.13. Незащищенные места на стене (амплитуда колебаний по оси oy):

а) обнаружение факта разговора; б) прослушивание информации

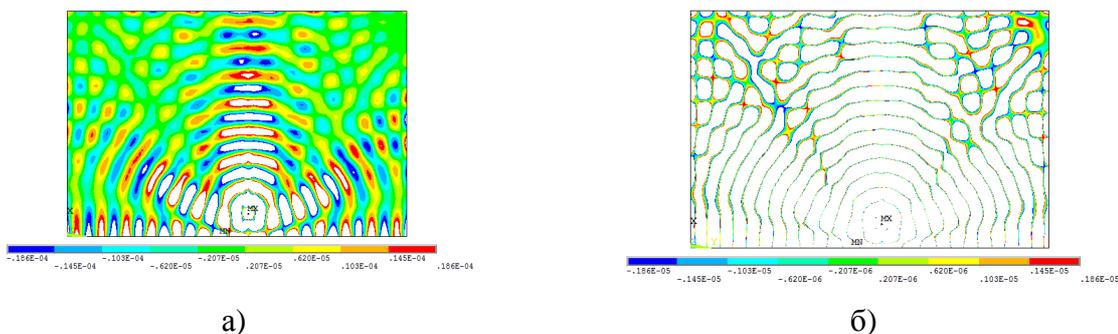


Рис.14. Незащищенные места на стене (амплитуда колебаний по оси oz):

а) обнаружение факта разговора; б) прослушивание информации

Вывод: определено, что существенная доля акустической энергии виброколебаний уходит по осям x и y (см. таблицу).

	Модель со стеной и виброизлучателем	Модель со стеной, воздухом и источником звука
По оси x	51 %	28 %
По оси y	25 %	64 %

Для выбранной формы помещения, материалов, частоты установлен факт незащищенности при использовании типового одноосного виброакустического генератора. Возможно лучшую защиту могли бы обеспечивать появившиеся недавно трехосные виброизлучатели. Это вопрос ведущих исследований. Так же стоит отметить, что литература по применению ПК ANSYS в акустике встречается крайне редко.

Список литературы

1. Кузнецов А. Техника промышленного шпионажа. Что нужно знать потребителю // Электронный дайджест. 2004. № 8. С. 25-29.
2. Вибрации в технике: справочник. В 6 т. Т. 1. Колебания линейных систем / под ред. В.В. Болотина М.: Машиностроение, 1981. 1981. 351 с.
3. Berger E.H. The Noise Manual. Fairfax: American Industrial Hygiene Association, 2003. 796 p.
4. Аппаратура защиты информации от акустической разведки. Аппаратуры «Соната АВ» модели 1М и 3М. Излучатели. Режим доступа: <http://www.npoanna.ru/Content.aspx?name=models.izluch-av> (дата обращения 15.03.2015)
5. Дворянкин С.В., Макаров Ю.К., Хорев А.А. Обоснование критериев эффективности защиты речевой информации от утечки по техническим каналам // Защита информации. Инсайд. 2007. № 2. С. 18-25.